六盘山区国土空间生态安全格局构建与分区优化

包玉斌[1]， 王耀宗[2]， 路 锋[1]， 刘自增[1]， 马大为[1]，
杨 勇[1]， 吴 娟[1]， 张永康[1]

（1. 宁夏回族自治区遥感调查院，宁夏 银川 750021；2. 宁夏回族自治区生态环境信息与应急中心，宁夏 银川 750002）

摘 要：生态安全格局构建是保障人类福祉和健康发展的重要途径，是践行山水林田湖草沙生命共同体理念的具体举措，选取具有重要生态地位和屏障作用的宁夏六盘山区，将InVEST模型生态服务评价优势和Circuitscape电路理论景观模型廊道识别优势充分结合，采用"源地—廊道—节点"的研究范式开展六盘山区生态安全格局构建和生态修复分区。结果表明：六盘山区共有生态源地75个，占研究区总面积的21.8%，呈现山系格局、县域拓展特征；关键生态廊道47处，总长度211.6 km，需要优先保护修复的夹点和障碍点分别为547处和217处，面积分别为626.9 km^2和893.9 km^2；生态屏障带面积占比17.4%，需要实施最严格的生态保护措施，保育区、修复提升区和控制调节区的面积占比分别为6.5%、38.2%和37.9%，需要加强生态监测和实施差异化修复措施，科学划定三区三线和全面协调发展保护关系。研究结果可为六盘山区国土空间生态保护修复、政策制定及工程布局提供参考。

关键词：国土空间生态修复；生态安全格局；电路理论；InVEST模型；六盘山

随着人类社会和经济向前发展的现实需要，不可避免的推动城市扩张、基础设施建设、工业采矿、农业开发等高强度人类活动，致使土地利用方式和空间格局发生改变、自然资源过渡利用、景观破碎化和生境面积萎缩，由此引发生态系统服务能力下降、生物多样性锐减、气候变化等威胁野生生物和人类生存的全球性问题[1-2]。进入21世纪，可持续发展和构建人与自然和谐共生的生态安全理念逐渐深入人心，如何优化和权衡生态系统管理、保护与发展之间的关系成为政府和学术界的重要议题[3]。

生态安全格局构建是保障人类福祉和健康发展的重要方式[4]，是识别重要生物保护源地、生态系统服务空间、生态系统廊道格局的重要途径[3-4]。生态安全格局经历了"城市增长边界"、"绿色基础设施"、"田园城市"等[3-4]早期生态规划理念探索，到后来的"场地保护与缓冲区"、"生态网络与绿道"、"景观格局"等[4-5]大量理论方法研究逐步走向成熟。中国学者俞孔坚等[6]于20世纪90年代提出了明确的景观生态安全格局概念，随后众多学者在地理学、生态学、城市规划及其交叉学科领域开展了大量相关研究和探索[7-8]，研究方向也从最初定性的景观分析与规划、定量生态格局分析[9]，过渡到引入众多生态理论与模型的时空格局情景决策、动态模拟与趋势分析等快速发展[10-11]，研究方法也从最初的单一土地利用格局分析到引入景观格局指数[12]、最小累计阻力模型[13]、InVEST模型[14]、电路理论景观模型（Circuitscape）[15]等丰富情景模拟与决策分析方法，显著提高了生态安全格局构建和国土空间生态修复分区的可靠度。例如陈昕等[4]基于"重要性—敏感性—连通性"理论，吴健生等[16]基于生态系统服务与引力模型，付凤杰等[15]基于"源地识别—阻力面构建—廊道提取"的一般范式，分别在广东、珠三角、广西等地开展了生态安全构建与生态修复研究，取得了良好的决策支撑效果。当前，生态安全格局构建的理论、模型、方法仍随着技术手段创新在不断完善，但"源地—廊道—节点"的范式是现阶段该领域的主流研究方法之一[3]。经过大量研究实践，由大自然保护协会借助电流和生态流的相似特

收稿日期：2022-12-23； **修订日期：**2023-03-24
基金项目：宁夏自然科学基金项目（2022AAC03669）
作者简介：包玉斌（1988-），男，硕士，工程师，主要从事生态评价与规划研究. E-mail: byb520.cool@163.com

性而开发的电路理论景观模型(Circuitscape)在生态廊道构建中具有理论方法优势[17-18],而由大自然保护协会和美国斯坦福大学共同研究发布的InVEST生态服务供需权衡模型在生态源地识别中具有理论方法优势[14,19],将两种方法同时引入到生态安全格局构建中能够发挥各自优势、显著提高模拟结果的可靠度,是当前该领域研究的首选方法之一[14,19]。

随着生态文明建设上升为国家战略[20],如何深入践行"山水林田湖草沙系统治理生命共同体"理念[21],科学识别国土空间生态保护修复关键区域,高效诊断生态源地、节点与廊道修复体系,转换生态修复管理尺度与力度,高质量、系统化、体系化构建区域生态安全格局既是现实需要又是难点热点[3-4]。本文以宁夏六盘山区为研究区,采取"源地—廊道—节点"的生态安全格局研究范式[21],同时引入InVEST模型[14,19]和电路理论景观模型(Circuitscape)[17-18],借助AHP(Analytic Hierarchy Process)层次分析权重法[22]开展生态源地、生态廊道和生态障碍点识别,在此基础上开展生态安全格局构建和国土空间生态保护修复分区,为该区域一体化、系统化、体系化生态修复、政策制定及工程布局提供重要参考,同时为黄河流域生态保护和高质量发展先行区建设提供支撑。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

六盘山区位于宁夏南部黄土丘陵沟壑区,海拔1150~2900 m,境内支离破碎,沟壑纵横,水土流失严重。六盘山坐落于宁夏南端,平行两列向北延伸,构成六盘山—西华山山系和六盘山—云雾山山系,海拔2100~2900 m。该区属于温带半湿润半干旱季风气候,南湿北干特征明显,年降水量约200~700 mm,形成以草原植被为主体,林灌草沿山分布格局特征[23]。黄河一二级支流的主要水源涵养地,年平均径流量达7.28×10^8 m^3,具有黄土高原上的"湿岛"之称。境内野生维管束植物达1347种,野生脊椎动物达384种,占宁夏种数的76.8%、全国总种数的6.1%,具有西北"种质资源基因库"之称[23],六盘山地区产业发展以农业和轻工业为主。根据《六盘山生态保护修复专项规划(2020—2025)》,研究区涉及4个流域9个县区,总面积18680.2 km^2,占宁夏总面积的35.9%(图1)。

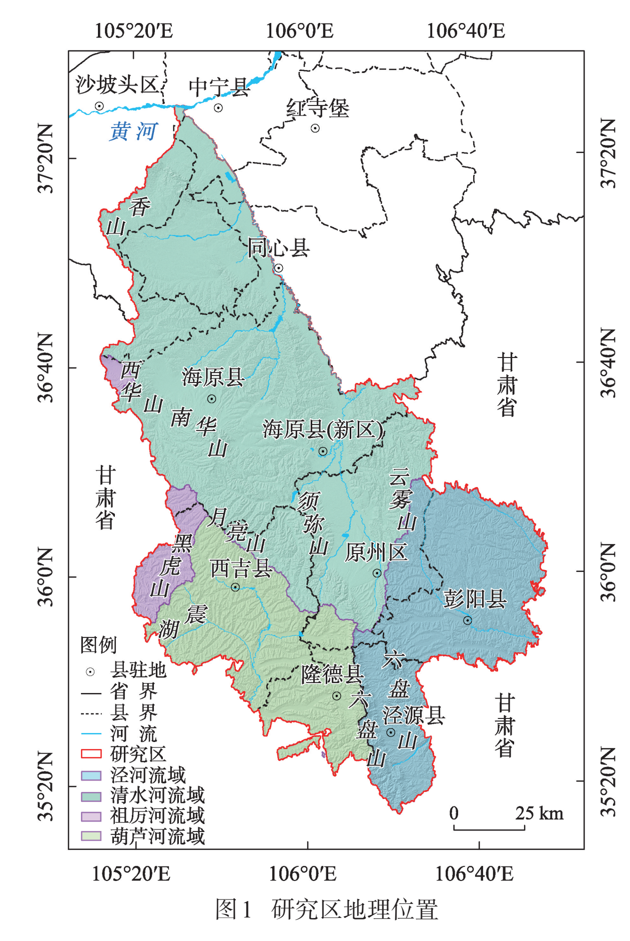


图1 研究区地理位置

Fig. 1 Location of the study area

1.2 数据来源

本文主要数据需求包括生态重要性评价因子和生态阻力面构建指标因子两部分,具体数据来源如下:Landsat 8 OLI数据自地理空间数据云平台(http://www.gscloud.cn)免费获取。土地利用/覆被数据源于全国生态环境遥感调查宁夏专题调查数据(2020年),空间分辨率30 m。DEM数据和VIIRS夜间灯光因子源于中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn),DEM为ALOS数字高程模型数据,空间分辨率12.5 m。归一化植被指数(NDVI),利用ENVI遥感软件自Landsat 8 OLI影像反演提取,空间分辨率30 m,用于粮食供给服务计算。降水量和土壤数据分别源自中国气象数据网(http://date.cma.cn)和国家林业和草原科学数据中心(http://www.forestdata.cn),用于产水服务模拟。降雨侵蚀力因子、土壤可蚀性因子、潜在蒸散量数据源于国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn)(2020年),用于土壤保持和产水服务模拟。植被净初级生产力(NPP),由CASA模型计算,获取30 m空间分辨率数据(2020年),用于固碳服务

模拟。基础地理数据收集自地方各相关单位，并经投影转换和标准化处理，用于生态阻力面构建。

1.3 评估方法

1.3.1 生态源地识别 选取产水服务、生境维持、土壤保持、固碳服务和粮食供给5种重要性评价因子用以识别生态源地。固碳服务由CASA模型计算[14]获取NPP间接估算，土壤保持、产水服务和生境维持均采用InVEST模型Sediment Delivery Ratio model模块[24]、Water Yield model模块[25]和Habitat Quality model模块[26]计算(表1)；粮食供给采用NDVI的全年最大值对统计年鉴中县区农作物产量空间插值获取[14,19](表1)。采用模糊隶属度函数进行数据标准化处理，并根据六盘山所处生态地位和各项生态系统服务因子对保障区域生态安全的重要性程度，通过查阅文献和专家打分[27-28]，构建层次分析法(AHP)开展权重分析[22]，最终获取生态重要性综合评价指数。利用ArcGIS分位数法开展重要性分级，选取极重要区并对距离小于250 m细碎图斑经ArcGIS聚合处理、剔除面积小于1 km²的独立图斑，叠加现有自然保护地，最终识别出生态源地。模糊隶属度函数计算方法如下：

$$\overline{c_i} = \left(c_i - c_{\min}\right)/\left(c_{\max} - c_{\min}\right) \tag{1}$$

式中：$\overline{c_i}$ (i=1，2，3)为标准化值，无量纲化介于0~1之间；$c_{\max}$和$c_{\min}$分别为各评价因子实际最大值和最小值；c_i为各评价因子的实际量值[24]。

AHP是一种定性与定量相结合的多目标决策实用方法，通过建立系统层次结构、构造判断矩阵、判断矩阵一致性检验等步骤完成[22]。其一致性检验方法如下：

$$CI = \left(\lambda_{\max} - n\right)/\left(n - 1\right) \tag{2}$$

$$CR = CI/RI \tag{3}$$

式中：CI为一致性指标值；$\lambda_{\max}$为矩阵最大特征根；n为指标个数；RI为平均随机一致性指标值；CR为一致性检验值，当$CR < 0.1$时，判断矩阵具有满意的一致性。经计算本次生态服务因子权重$\lambda_{\max}$=5.156，CI=0.039，RI=1.120，CR=0.035 < 0.1，通过一致性检验。

1.3.2 生态阻力面建立 阻力面用来指示物种在景观斑块间的可通达性，阻力值大小受人类活动胁迫、景观破碎化和生态质量状况影响，选取土地利

表1 生态重要性评价方法

Tab. 1 Methods for evaluating the importance of ecosystems

生态系统服务	权重	评估模型/方法	基本原理及计算公式
生境维持	0.417	InVEST-Habitat Quality model	$Q_{xj} = H_j\left(1 - \left(\frac{D^z_{xj}}{D^z_{xj} + k^z}\right)\right)$ 式中：Q_{xj}为土地利用类型j中栅格x的生境质量；D_{xj}为土地利用类型j中栅格x所受胁迫水平；k为半饱和常数，通常取D_{xj}最大值的一半；H_j为土地利用类型j的生境适合性；z为归一化常量[26]
产水服务	0.316	InVEST-Water Yield model	$Y_{jx} = \left(1 - \frac{\mathrm{AET}_{xj}}{P_x}\right) \times P_x,\ \frac{\mathrm{AET}_{xj}}{P_x} = \frac{1 + \omega_x \times R_{xj}}{1 + \omega_x \times R_{xj} + 1/R_{xj}},\ R_{xj} = \frac{k \times \mathrm{ET}_0}{P_x}$ 式中：Y_{jx}为土地利用类型j中栅格x的年产水量(mm)；P_x为栅格单元x的年均降雨量；AET_{xj}为土地利用类型j中栅格x的年平均蒸散发量；R_{xj}为土地利用类型j中栅格x的干燥指数，表示潜在蒸发量与降雨量的比值；ω_x为修正植被年可利用水量与降水量的比值；k为植被系数，由植被叶面积指数计算[25]，ET_0为潜在蒸散发量(mm)。植被年可利用水量利用土壤质地经验公式计算，具体见文献[24-25]
土壤保持	0.146	InVEST-Sediment Delivery Ratio model	$\mathrm{SC}_x = R_x \times K_x \times \mathrm{LS}_x \times (1 - C_x \times P_x) + \mathrm{SR}_x,$ $\mathrm{SR}_x = E_x \sum_{y=1}^{x-1} \mathrm{SE}_y \prod_{z=y+1}^{x-1} (1 - E_z)$ 式中：SC_x和SR_x分别为栅格x的土壤保持量($\mathrm{t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}}$)和泥沙持留量($\mathrm{t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}}$)；$\mathrm{SE}_y$为上坡栅格$y$产生的泥沙量($\mathrm{t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}}$)，$E_x$为栅格$x$的泥沙持留效率[24]，$E_z$为上坡栅格$z$的泥沙持留量($\mathrm{t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}}$)；$R_x$、$K_x$、$\mathrm{LS}_x$、$C_x$和$P_x$分别为栅格$x$的降雨侵蚀力因子、土壤可蚀性因子、坡度坡长因子、覆盖管理因子和水土保持措施因子
固碳服务	0.082	CASA模型-NPP法	$\mathrm{NPP}(x, t) = \mathrm{APAR}(x, t) \times \xi(x, t)$ 式中：$\mathrm{NPP}(x, t)$为栅格x的植被在t时段内的净初级生产力($\mathrm{g\ C \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}}$)；$\mathrm{APAR}(x, t)$为栅格$x$在$t$时段内植被所吸收的光和有效辐射；$\xi(x, t)$为栅格$x$的植被在$t$时段内的光能转化率[14]
粮食供给	0.038	NDVI配比法	$Crop_{mn} = \left(\mathrm{NDVI}_m/\mathrm{NDVI}_n\right) \times Crop_n$ 式中：$Crop_{mn}$为第n个县第m个栅格的粮食供给服务($\mathrm{t \cdot a^{-1}}$)；NDVI_m为该栅格全年中的NDVI最大值；NDVI_n为第n个县的NDVI全年最大值的和；$Crop_n$为第n个县的粮食年产量($\mathrm{t \cdot a^{-1}}$)[14,19]

用、植被覆盖度、距水体距离、干旱指数、坡度、水土流失敏感性共6项自然环境因子，距居民点距离、距采矿点距离、距公路铁路距离、夜间灯光因子共4项人类活动因子，经查阅文献及专家打分[13,27]，采用AHP法计算因子权重（λ_{max}=10.261，CI=0.029，RI=1.155，CR=0.025＜0.1，通过一致性检验），通过空间叠图法完成阻力面构建（表2）。

1.3.3 生态廊道构建 选用由大自然保护协会McRaer等[29-31]学者开发的电路理论景观模型（Circuitscape）开展生态廊道识别，模型包括Linkage Pathways Mapper模块、Barrier Mapper模块、Pinchpoint Mapper模块和Centrality Mapper模块，分别用于识别生态廊道、生态障碍点、生态夹点和核心生态源地。该模型将生态源地视为电压、生态廊道等价为电流路径、生态障碍区视作电阻。具体计算方法如下：

$$I_{lp} = U_{cm}/R_{bm} \tag{4}$$

式中：I_{lp}、U_{cm}和R_{bm}分别为电流、电压和有效电阻。R_{bm}的生态学意义为反映景观的破碎化程度和节点间阻隔效应的指标，是表征自然环境因子的生境适宜度和人类活动的干扰强度；I_{lp}的生态学意义为物种在景观间迁移、运动的概率路径，根据电流高低识别潜在生态廊道和关键节点；U_{cm}的生态学意义为生态过程正向演替中起到关键辐射或推动作用的核心生态源地。

1.3.4 生态安全格局构建与分区 以维护区域生态过程稳定及格局安全为目标，以生态重要性评价、阻力面构建为基础，借助空间叠图分析、电路理论景观模型识别生态源地、廊道、障碍点和夹点等生态安全格局关键要素，采取ArcGIS自然间断点法将生态阻力面划分为高值、中值和低值区，从区域国土空间整体性、完整性和连续性视角，以"功能—问题"为导向，在格局要素和阻力阈值空间区划组合的基础上，完成生态安全格局构建与生态修复分区，并提出点、线、面优化策略。

2 结果与分析

2.1 生态重要性评价及源地识别

根据《国家生态保护红线划定技术指南（试行）》所用分位数（Quantile）分类法，将生态重要性评价单一因子和综合评价指数分为极重要、高度重要、中度重要、较重要和一般重要共5个等级，极重要区是维护生态系统稳定、安全的关键区域，具有不可替代和重点保护的生态需求。生境质量极重要区占比25.4%（表3），主要沿"六盘山—南华山"南北向分布，受自然保护地、生态保护红线等严格空

表2 生态阻力面构建

Tab. 2 Construction of ecological resistance surface

阻力因子		权重	阻力值					
			1	10	30	50	70	90
自然环境因子	土地覆被类型	0.269	森林、湿地	灌丛、草地	农田	荒漠	其他	城镇
	植被覆盖度/%	0.172	–	≥70	50~70	30~50	10~30	＜10
	距离水体距离/km	0.127	–	＜1	1~3	3~5	5~10	≥10
	干旱指数	0.090	–	＜0.45	0.45~0.58	0.58~0.66	0.66~0.71	≥0.71
	坡度/(°)	0.056	–	＜6	6~15	15~25	25~45	≥45
	水土流失敏感性	0.036	–	一般敏感	较敏感	中度敏感	高度敏感	极敏感
社会经济因子	距离居民点/km	0.103	–	≥2	1~2	0.5~1	0.25~0.5	＜0.25
	距离采矿/km	0.073	≥15	10~15	5~10	2~5	1~2	＜10
	距离道路/km	0.047	≥10	5~10	2~5	1~2	0.5~1	＜0.5
	夜间灯光因子	0.027	＜0.21	0.21~0.48		0.48~0.74	0.74~1.79	≥1.79

表3 生态系统服务极重要区面积构成

Tab. 3 Extremely important area composition of ecosystem services

生境质量		产水服务		土壤保持		固碳服务		粮食供给		综合评价	
面积/km²	比重/%	面积/km²	比重/%	面积/km²	比重/%	面积/km²	比重/%	面积/km²	比重/%	面积/km²	比重/%
4747.7	25.4	6121.3	32.8	1749.6	9.4	5183.0	27.7	5518.0	29.5	4473.8	23.9

间管制，是区域重要的生物多样性保护走廊（图2a）。产水服务极重要区占比32.8%（表3），以彭阳县、泾源县和隆德县等六盘山主体区为主（图2b），发挥区域“湿岛”效应。土壤保持极重要区占比9.4%（表3），集中在“六盘山—南华山”高覆盖度植被带和彭阳县水土保持治理区（图2c）。固碳服务极重要区占比27.7%，呈现“森林—农田”植被格局特征，形成“六盘山—南华山”森林固碳带和沿清水河走廊农田固碳带（图2d）。粮食供给极重要区占比29.5%（表3），以西吉县和清水河走廊为主（图2e）。

经空间叠加分析，综合生态服务功能极重要区占比23.9%（表3），呈现山系格局、县域拓展特征，形成“六盘山—南华山”和“六盘山—云雾山”极重要生态功能屏障带，并沿“原州区—海原县”北向拓展和沿“彭阳县—隆德县”东西向拓展（图2f）。

提取综合生态服务功能极重要区、叠加保护地、去除细碎图斑获取生态源地75个，占研究区总面积的21.8%，保持了山系格局、县域拓展的空间格局特征，源地以自然植被构成主体，草地、灌丛和林地占比分别为49.1%、30.8%和9.0%（图3a），生态功能稳定和屏障作用显著。县域角度，泾源县和彭阳县生态源地最为集中，面积占比分别为25.2%和

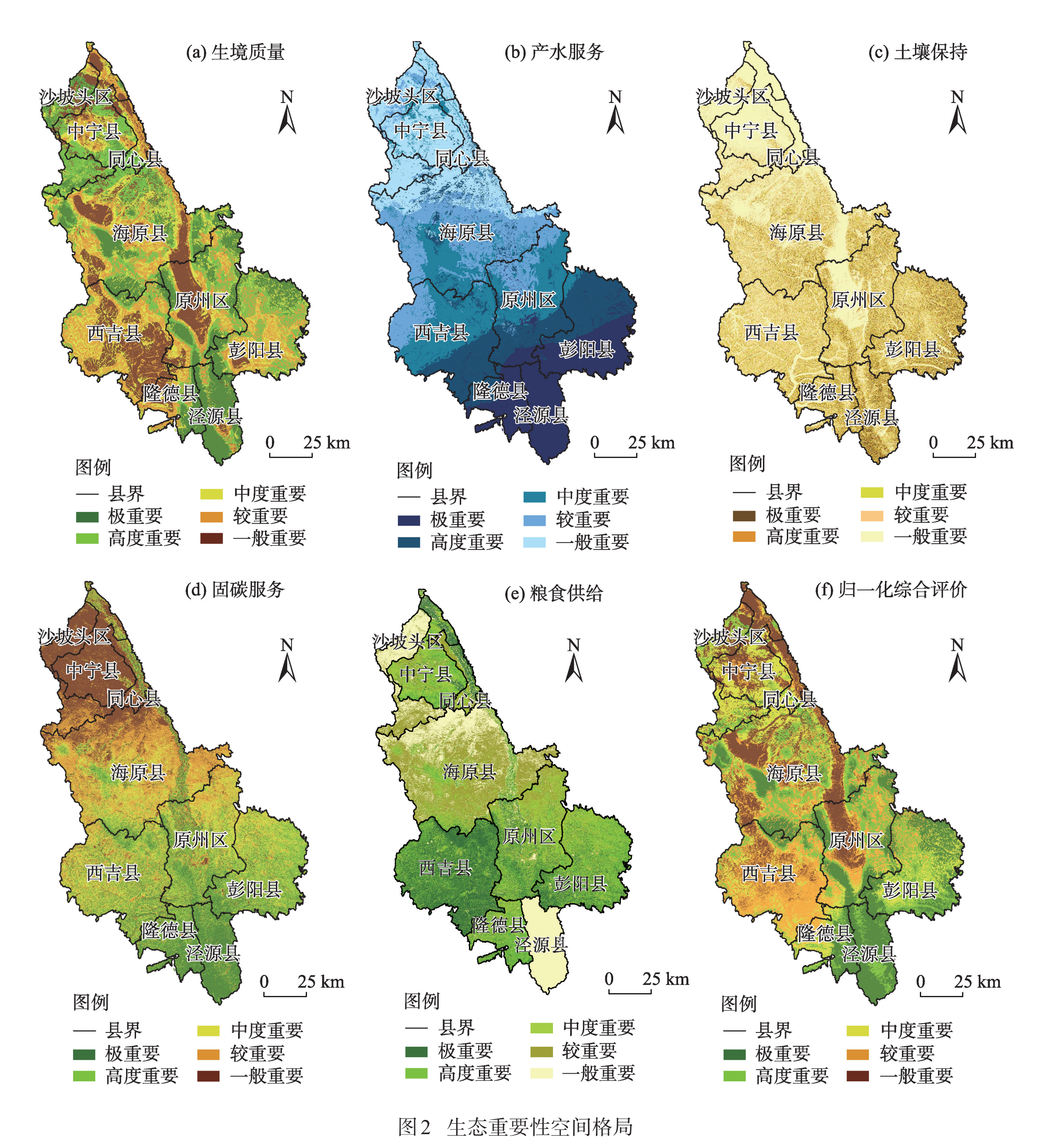


图2 生态重要性空间格局

Fig. 2 Spatial pattern of ecological importance

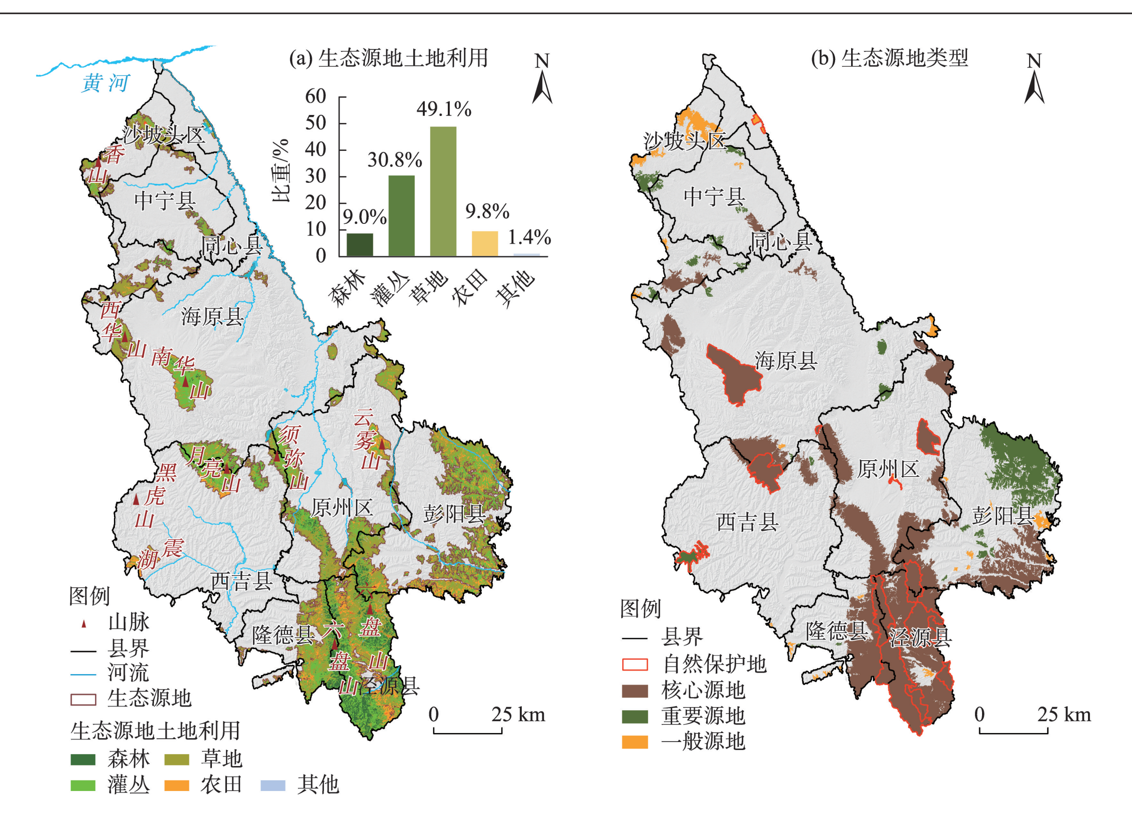


图3 生态源地空间格局

Fig. 3 Spatial pattern of ecological sources

24.3%(表4)，但泾源县仅为两个高完整度斑块，成为生态屏障战略核心，彭阳县25个高聚集度斑块(表4)，成为水土保持功能战略核心，其次原州区、海原县和隆德县的占比分别为14.4%、12.4%、10.1%(表4)，发挥重要生态屏障延伸拓展作用。采用自然间断点法设置源地电流密度阈值，共识别出核心生态源地26个，面积占比达79.8%(表5)，集中在“六盘山—南华山”和“六盘山—云雾山”屏障带(图3b)，发挥战略生态辐射作用；重要生态源地共25个，面积占比15.0%(表5)，位于六盘山区东、西、北边缘带(图3b)，发挥重要生态网络和安全格局节点作用；一般生态源地共24个，面积占比5.2%(表5)，分散在核心源地和重要源地之间(图3b)，发挥重要缓冲带和过度带作用。整体上，生态系统结构、功能和质量优质区均识别为生态源地，符合实际地域、植被和生态格局特征。

表4 生态源地县域构成

Tab. 4 Counties composition of ecological sources

类型	生态源地									
	泾源县	彭阳县	原州区	海原县	隆德县	西吉县	沙坡头区	中宁县	同心县	总计
数量/个	2	25	10	18	9	8	12	8	4	96
面积/km²	1029.0	991.5	589.2	504.7	410.8	243.5	226.3	74.5	10.9	4080.3
百分比/%	25.2	24.3	14.4	12.4	10.1	6.0	5.5	1.8	0.2	100.0

表5 生态源地重要性构成

Tab. 5 Composition of the importance of ecological sources

生态源地重要性	电流阈值	数量/个	比重/%	面积/km²	比重/%
一般源地	2.0~235.9	24	32.0	212.6	5.2
重要源地	235.9~394.1	25	33.3	611.1	15.0
核心源地	394.1~1380.0	26	34.7	3256.6	79.8
总计		75	100.0	4080.3	100.0

2.2 阻力面构建及生态廊道识别

以"问题—功能—胁迫"为导向,选取自然环境和社会经济共10个指标构建生态阻力面,不仅可以模拟潜在生态廊道路径,同时,阻力值大小可表征区域生态压力和生态质量状况。经空间叠图和自然间断点法设定阻力阈值,将生态阻力面分为低值区、中值区和高值区,比重分别为44.2%、32.4%和23.4%(表6),呈现"两带两廊"空间格局(图4),两带即"六盘山—南华山"低阻力生态屏障带和"六盘山—云雾山"低阻力生态屏障带,两廊为沿清水河高阻力胁迫走廊和"原州—海原"高阻力胁迫走廊,构成了生态安全格局和保护修复的基本骨架。

表6 生态阻力面分区构成

Tab. 6 Composition of ecological resistance surface zoning

	低值区	中值区	高值区	合计
面积/km²	8259.7	6049.2	4371.3	18680.2
比重/%	44.2	32.4	23.4	100.0

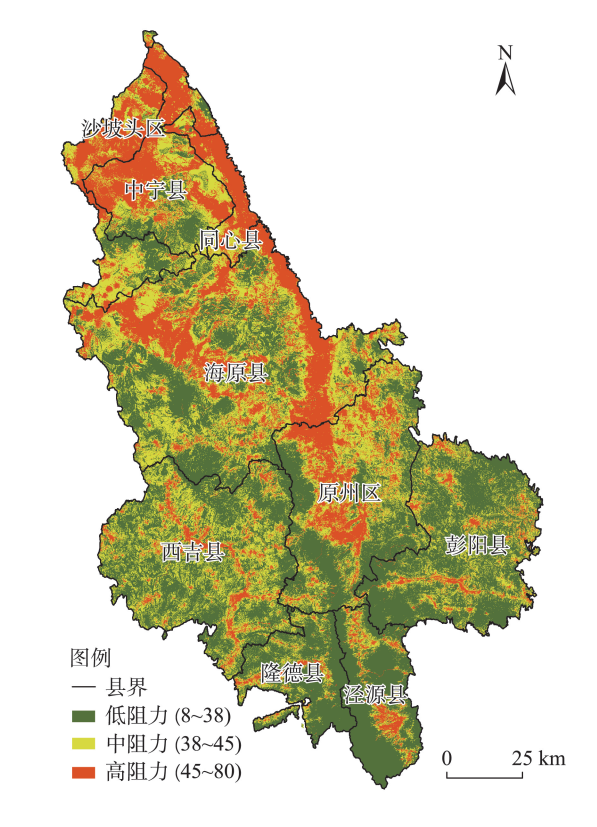


图4 生态阻力面阈值分区

Fig. 4 Threshold zoning of ecological resistance surface

通过模拟获取生态廊道138处,其中关键生态廊道47处,总长度211.6 km,占比17.6%(表5),主要分布在"两带"区域(图5a),连接核心生态源地,高密度物质、能量、信息交换通道,对维护生态单元的连续性、完整性、安全性具有不可替代和优先修复的生态意义。重要生态廊道46处,总长413.1 km,所占比重34.3%(表7),主要连接外围生态源地(图5a),对维持生态系统良性循环和平衡,降低保护地孤立化、生境破碎化和栖息地退化发挥重要作用。一般生态廊道主要分布在北部山地(图5a),总长

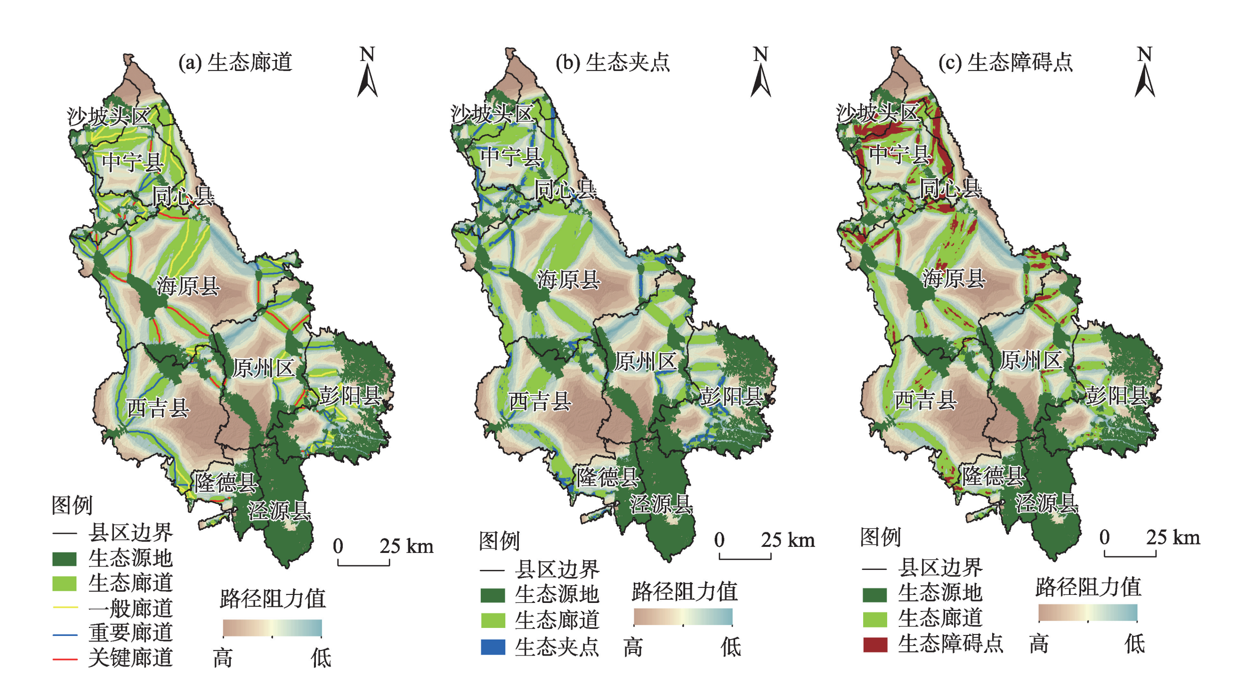


图5 生态廊道及夹点和障碍点空间格局

Fig. 5 Spatial pattern of ecological corridors, pinch points and barriers

表7　生态廊道及夹点和障碍点识别

Tab. 7　Identification of ecological corridors, pinch points and barriers

电流、电阻值	生态类型	阈值	类型	数量/个	比重/%	面积、长度	比重/%
电流值	生态廊道	2.0~80.8	一般廊道	45	32.6	579.0 km	48.1
		80.8~162.5	重要廊道	46	33.3	413.1 km	34.3
		162.5~616.0	关键廊道	47	34.1	211.6 km	17.6
			总计	138	100.0	1203.7 km	100.0
电流值	生态夹点	0.02~0.27	≤1 km^2夹点	455	83.2	37.6 km^2	6.0
			1~5 km^2夹点	57	10.4	148.1 km^2	23.6
			≥5 km^2夹点	35	6.4	441.2 km^2	70.4
			总计	547	100.0	626.9 km^2	100.0
电阻值	生态障碍点	36.2~92.7	≤1 km^2障碍点	146	67.3	31.7 km^2	3.5
			1~5 km^2 障碍点	42	19.3	103.4 km^2	11.6
			≥5 km^2障碍点	29	13.4	758.8 km^2	84.9
			总计	217	100.0	893.9 km^2	100.0

579.0 km,占比48.1%(表7),主要连通受胁迫阻隔的分散生态源地,对降低生态退化风险、提升生态韧性意义重大。

受农田、城镇村或线状基础设施胁迫,潜在生态廊道被挤压在自然植被或河流等狭窄处形成"夹点","夹点"是生态网络体系良性循环和维护生态格局安全的关键,需要严格保护和优先修复。经电流阈值分析共识别出生态"夹点"547个,数量以1 km^2以下为主,占比83.2%(表7),空间分布以"两带"和彭阳县、西吉县为主(图5b);大于1 km^2的夹点数量较少,但斑块面积较大,以中北部干旱荒漠带为主(图5b),受土地荒漠化、水土流失、人类活动等综合胁迫,生态廊道被压缩在狭窄夹点处,修复夹点、扩展廊道成为控制生态退化风险的迫切需求。经电阻阈值分析共识别出生态障碍点217个,数量以1 km^2以下为主,占比67.3%(表7),以中南部生态系统良好区域为主(图5c),"障碍点"类型依次为农田、植被退化点和镇村。大于1 km^2夹点共71个,面积占比达96.5%,以中北部干旱荒漠带为主,土地荒漠化、植被退化、农业活动和城镇建设使生态障碍点向外扩展延伸(图5c),斑块面积变大。要将"障碍点"和"夹点"处的生态保护修复、降低人类活动胁迫作为构建区域生态安全格局的优先任务。

2.3　生态安全格局构建及分区策略

通过生态阻力区划和要素空间组合,研究区形成"两屏两廊四区"的生态安全格局特征。生态源地及自然保护地是电流密度的高值区,发挥生态战略点和节点作用。研究区核心生态源地、关键生态廊道和生态战略点均分布在"六盘山—南华山"和"六盘山—云雾山"地带,形成东西互补的沿山生态屏障(图6)。彭阳县、西吉县和海原县以北成片或斑块状分布的生态源地,生态系统良好、功能关键,作为重要生态保育区(图6)。生态廊道是安全格局

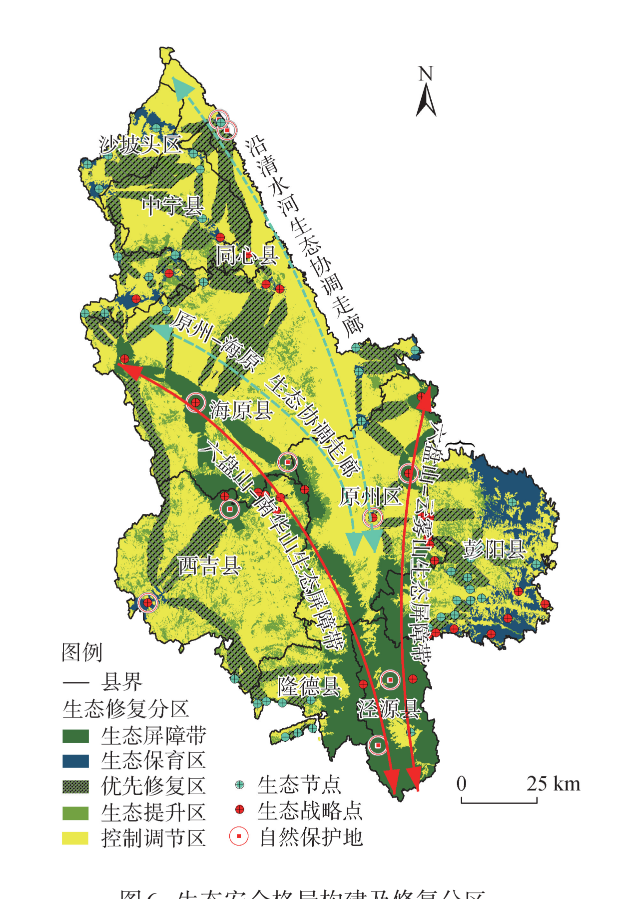


图6　生态安全格局构建及修复分区

Fig. 6　Ecological security pattern construction and restoration zoning

塑造的重要环节，是源地、节点和战略点互连互通的关键，作为优先修复区（图6）。生态阻力低值区受胁迫小、生态质量较好，作为生态提升区发挥生态缓冲带作用（图6）。生态阻力中高值区，人类活动胁迫强度大、生态空间易受不合理开发挤占，作为生态控制调节区，主要分布在"原州—海原"和沿清水河两廊地带（图6）。

生态屏障带总面积3248.7 km^2，占比17.4%（表8），由核心生态源地和关键生态廊道组成，受保护地、生态保护红线等严格空间管制、人类活动干扰小，生态系统良性循环、功能稳定，进一步加强源地和廊道生态监测和问题诊断，采取植被结构优化、生态退耕和人类活动点有序退出等措施，推进关键"夹点"、"障碍点"生态修复，实现一体化保护管理，发挥战略生态辐射和屏障作用。

表8 生态安全格局构建及修复分区

Tab. 8 Ecological security pattern construction and restoration zoning

生态修复分区	格局类型	面积/km^2	面积占比/%
生态屏障带	核心源地	2852.8	15.3
	关键廊道	395.9	2.1
生态保育区	核心源地	417.7	2.2
	其他源地	810.1	4.3
修复提升区	优先修复区（其他生态廊道）	3449.2	18.5
	生态提升区（生态阻力低值区）	3670.7	19.7
控制调节区	生态阻力中值区	3929.3	21.0
	生态阻力高值区	3154.5	16.9
	总计	18680.2	100.0

生态保育区由核心源地和其他源地构成，总面积1227.8 km^2，占比6.5%（表8），以自然植被构成主体，且覆盖度较高，分布在彭阳县东部和北部荒漠区，发挥重要水土保持和防风固沙功能作用，以生态系统结构优化和功能提升为导向，以巩固现有生态建设成效、控制生态退化风险为目标。加强封禁保育和成效监测，以区域和流域为单元，综合实施草原生态、坡改梯和水土保持林建设工程，持续提高林草覆盖度、水土涵养能力和生态韧性。

优先修复区为关键廊道以外的其他生态廊道区，总面积3449.2 km^2，占比18.5%（表8），因生态退化、城镇村建设、农业活动和基础设施建设等形成大量"夹点"和"障碍点"，采取压沙地退出、生态退耕、矿山生态修复、"四荒地"治理、生态搬迁、营造生物通道等差异化措施，保障生态网络健康稳定和良性循环。

生态提升区为生态阻力低值区，总面积3670.7 km^2，占比19.7%（表8），呈面状分散分布特征，加强生态监测和问题诊断，结合生态保护红线空间管制和生态功能县建设，适度限制人类活动、重点开展退化区生态修复，提高林草覆盖率，发挥生态缓冲带作用。

控制调节区为生态阻力中高值区，总面积7083.8 km^2，占比37.9%（表8），呈现沿清水河和"原州—海原"两廊格局，土地荒漠化、水土流失、植被覆盖度低等生态环境问题突显，农业活动、城镇建设、人口密度大等生态胁迫强烈，国土空间开发保护矛盾尖锐，加强国土空间综合整治修复和科学划定三区三线，控制建设用地无序扩张、提高土地节约集约利用水平，加快探索"两山"转化路径和积极寻求可持续发展模式。

3 讨 论

六盘山境内动植物资源极其丰富，是区域重要的"种质资源基因库"、黄河流域重要的水源涵养地，是国家两屏三带格局的重要组成部分，生态地位极其重要、生态安全极其关键。在此背景下，本文从区域一体化、系统化、体系化生态修复视角，引入InVEST模型和Circuitscape模型开展生态安全格局构建与分区优化，为该地区宏观尺度国土空间格局塑造与生态修复提供了空间指引。文中阻力面建立、廊道和生态源地的科学识别是生态安全格局构建的关键因素，目前，对于生态阻力面指标体系的构建和打分赋权尚未形成统一认识，而各因子阻力值确定的科学性和合理性仍在探究之中，本文的阻力值确定和权重分析也基于文献和专家咨询开展，虽然采用半定量化的层次分析法，但也难免受到专家经验和方法缺陷的影响。生态廊道构建方法主要集中在"费用—距离"理论支撑的众多方法中，而Circuitscape模型凭借其电流、电压、电阻与生态廊道、生态源地和生态障碍区具有很好的对应关系受到越来越多的应用，但同样模拟的精度和科学性受到生态阻力面建立的影响。此外，廊道构建的可靠性亦受生态源地识别准确性的影响，因为廊道以生态源地为起止点，通过费用距离理论和电路理

论模拟最优路径，而目前生态源地的识别主要采用综合因子评价法，而因子类型、尺度、权重、精度、图斑处理或研究者自身经验和对研究区的了解等都会左右识别结果。综上，因现阶段模型、方法、指标体系构建等共性问题所限，本研究结果局部尺度可靠性需要进一步提升，但宏观尺度可为六盘山区域生态保护修复，科学化生态管理、政策制定及工程空间布局提供重要参考。

4 结 论

采用"源地—廊道—节点"的研究范式，量化识别出生态源地、廊道、障碍点和夹点等关键要素，结合阻力面空间分析，完成生态安全格局构建与修复分区，为六盘山区推进全域化、全要素、全过程山水林田湖草沙生命共同体系统修复与格局塑造提供了空间指引。主要结论如下：

（1）研究区共有生态源地75个，总面积4080.3 km^2，占研究区比重的21.8%，呈现山系格局、县域拓展特征，为生态安全格局构建发挥生态战略点和节点作用。

（2）研究区共有生态廊道138处，其中关键生态廊道47处，总长度211.6 km，占廊道总长的17.6%，为生态源地互连互通和生态网络构建发挥关键作用。共识别生态夹点547个、生态障碍点217个，为生态廊道修复提供了工程任务具体指向。

（3）生态屏障带、保育区、修复提升区和控制调节区的面积占比分别为17.4%、6.5%、38.2%和37.9%。生态屏障带需要实施最严格的生态保护，提升区域生态辐射效应；保育区要加强封禁监测和植被恢复，控制生态退化风险；修复提升区实施生态质量提升差异化措施、维护生态网络健康稳定和良性循环，发挥生态缓冲带效应；控制调节区要科学划定三区三线和提升土地节约集约利用水平、全面协调可持续发展。

参考文献（References）：

[1] 王聪, 伍星, 傅伯杰, 等. 重点脆弱生态区生态恢复模式现状与发展方向[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7333-7343. [Wang Cong, Wu Xing, Fu Bojie, et al. Ecological restoration in the key ecologically vulnerable regions: Current situation and development direction[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): 7333-7343.]

[2] 易行, 白彩全, 梁龙武, 等. 国土生态修复研究的演进脉络与前沿进展[J]. 自然资源学报, 2020, 35(1): 37-52. [Yi Xing, Bai Caiquan, Liang Longwu, et al. The evolution and frontier development of land ecological restoration research[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(1): 37-52.]

[3] 彭建, 赵会娟, 刘焱序, 等. 区域生态安全格局构建研究进展与展望[J]. 地理研究, 2017, 36(3): 407-419. [Peng Jian, Zhao Huijuan, Liu Yanxu, et al. Research progress and prospect on regional ecological security pattern construction[J]. Geographical Research, 2017, 36(3): 407-419.]

[4] 陈昕, 彭建, 刘焱序, 等. 基于"重要性—敏感性—连通性"框架的云浮市生态安全格局构建[J]. 地理研究, 2017, 36(3): 471-484. [Chen Xin, Peng Jian, Liu Yanxu, et al. Constructing ecological security patterns in Yunfu City based on the framework of importance-sensitivity-connectivity[J]. Geographical Research, 2017, 36(3): 471-484.]

[5] 张亮, 岳文泽, 陈阳. 基于斑块复合属性特征的城市生态安全格局构建——以杭州市为例[J]. 生态学报, 2021, 41(11): 4632-4640. [Zhang Liang, Yue Wenze, Chen Yang. Construction of urban ecological security pattern based on of patch composite characteristics: A case study of Hangzhou[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(11): 4632-4640.]

[6] 俞孔坚, 李海龙, 李迪华, 等. 国土尺度生态安全格局[J]. 生态学报, 2009, 29(10): 5163-5175. [Yu Kongjian, Li Hailong, Li Dihua, et al. National scale ecological security pattern[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(10): 5163-5175.]

[7] 侯鹏, 王桥, 申文明, 等. 生态系统综合评估研究进展: 内涵、框架与挑战[J]. 地理研究, 2015, 34(10): 1809-1823. [Hou Peng, Wang Qiao, Shen Wenming, et al. Progress of integrated ecosystem assessment: Concept, framework and challenges[J]. Geographical Research, 2015, 34(10): 1809-1823.]

[8] 彭建, 李慧蕾, 刘焱序, 等. 雄安新区生态安全格局识别与优化策略[J]. 地理学报, 2018, 73(4): 701-710. [Peng Jian, Li Huilei, Liu Yanxu, et al. Identification and optimization of ecological security pattern in Xiong'an New Area[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(4): 701-710.]

[9] 韩宗伟, 焦胜, 胡亮, 等. 廊道与源地协调的国土空间生态安全格局构建[J]. 自然资源学报, 2019, 34(10): 2244-2256. [Han Zongwei, Jiao Sheng, Hu Liang, et al. Construction of ecological security pattern based on coordination between corridors and sources in national territorial space[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(10): 2244-2256.]

[10] 赵文祯, 韩增林, 闫晓露, 等. 基于生态系统服务多情景权衡的生态安全格局构建——以大连市瓦房店为例[J]. 自然资源学报, 2020, 35(3): 546-562. [Zhao Wenzhen, Han Zenglin, Yan Xiaolu, et al. Ecological security pattern construction based on multi-scenario trade-off of ecosystem services: A case study of Wafangdian, Dalian[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(3): 546-562.]

[11] 徐智超, 刘华民, 韩鹏, 等. 内蒙古生态安全时空演变特征及驱动力[J]. 生态学报, 2021, 41(11): 4354-4366. [Xu Zhichao, Liu

Huamin, Han Peng, et al. Analysis of the characteristics and driving forces of the temporal and spatial evolution of ecological security in Inner Mongolia[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(11): 4354-4366.]

[12] 吴金华, 刘思雨, 白帅. 基于景观生态安全的神木市生态廊道识别与优化[J]. 干旱区研究, 2021, 38(4): 1120-1127. [Wu Jinhua, Liu Siyu, Bai Shuai. Identification and optimization of ecological corridors in Shenmu City based on landscape ecological security [J]. Arid Zone Research, 2021, 38(4): 1120-1127.]

[13] 于成龙, 刘丹, 冯锐, 等. 基于最小累积阻力模型的东北地区生态安全格局构建[J]. 生态学报, 2021, 41(1): 290-301. [Yu Chenglong, Liu Dan, Feng Rui, et al. Construction of ecological security pattern in Northeast China based on MCR model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(1): 290-301.]

[14] 毛诚瑞, 代力民, 齐麟, 等. 基于生态系统服务的流域生态安全格局构建——以辽宁省辽河流域为例[J]. 生态学报, 2020, 40(18): 6486-6494. [Mao Chengrui, Dai Limin, Qi Lin, et al. Constructing ecological security pattern based on ecosystem services: A case study in Liaohe River Basin, Liaoning Province, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(18): 6486-6494.]

[15] 付凤杰, 刘珍环, 刘海. 基于生态安全格局的国土空间生态修复关键区域识别——以贺州市为例[J]. 生态学报, 2021, 41(9): 3406-3414. [Fu Fengjie, Liu Zhenhuan, Liu Hai. Identifying key areas of ecosystem restoration for territorial space based on ecological security pattern: A case study in Hezhou City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(9): 3406-3414.]

[16] 吴健生, 罗可雨, 马洪坤, 等. 基于生态系统服务与引力模型的珠三角生态安全与修复格局研究[J]. 生态学报, 2020, 40(23): 8417-8429. [Wu Jiansheng, Luo Keyu, Ma Hongkun, et al. Ecological security and restoration pattern of Pearl River Delta, based on ecosystem service and gravity model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23): 8417-8429.]

[17] McRae B H, Beier P. Circuit theory predicts gene flow in plant and animal populations[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(50): 19885-19890.

[18] Walpole A A, Bowman J, Murray D L, et al. Functional connectivity of lynx at their southern range periphery in Ontario, Canada[J]. Landscape Ecology, 2012, 27(5): 761-773.

[19] 苏冲, 董建权, 马志刚, 等. 基于生态安全格局的山水林田湖草生态保护修复优先区识别——以四川省华蓥山区为例[J]. 生态学报, 2019, 39(23): 8948-8956. [Su Chong, Dong Jianquan, Ma Zhigang, et al. Identifying priority areas for ecological protection and restoration of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands based on ecological security patterns: A case study in Huaying Mountain, Sichuan Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(23): 8948-8956.]

[20] 林勇, 樊景凤, 温泉, 等. 生态红线划分的理论和技术[J]. 生态学报, 2016, 36(5): 1244-1252. [Lin Yong, Fan Jingfeng, Wen Quan, et al. Primary exploration of ecological theories and technologies for delineation of ecological redline zones[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(5): 1244-1252.]

[21] 方莹, 王静, 黄隆杨, 等. 基于生态安全格局的国土空间生态保护修复关键区域诊断与识别——以烟台市为例[J]. 自然资源学报, 2020, 35(1): 190-203. [Fang Ying, Wang Jing, Huang Longyang, et al. Determining and identifying key areas of ecosystem preservation and restoration for territorial spatial planning based on ecological security patterns: A case study of Yantai City[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(1): 190-203.]

[22] 胡胜, 曹明明, 李婷, 等. 基于AHP和GIS的陕西省地震次生地质灾害危险性评价[J]. 第四纪研究, 2014, 34(2): 336-345. [Hu Sheng, Cao Mingming, Li Ting, et al. Danger assessment of earthouake-induced geological disasters in Shaanxi Provinces based on AHP and GIS[J]. Quaternary Sciences, 2014, 34(2): 336-345.]

[23] 包玉斌. 基于InVEST模型的宁夏生物多样性保护优先区域生境评估与生态廊道构建[J]. 宁夏大学学报(自然科学版), 2022, 43(3): 318- 324. [Bao Yubin. Habitat evaluation and ecological corridor construction of priority area for biodiversity conservation in Ningxia based on InVEST model[J]. Journal of Ningxia University (Natural Science Edition), 2022, 43(3): 318-324.]

[24] 包玉斌. 基于InVEST模型的陕北黄土高原生态服务功能时空变化研究[D]. 西安: 西北大学, 2015. [Bao Yubin. Temporal and Spatial Change of Ecological Services on Loess Plateau of Shaanxi by InVEST model[D]. Xi'an: Northwest University, 2015.]

[25] 包玉斌, 李婷, 柳辉, 等. 基于InVEST模型的陕北黄土高原水源涵养功能时空变化[J]. 地理研究, 2016, 35(4): 664-676. [Bao Yubin, Li Ting, Liu Hui, et al. Spatial and temporal changes of water conservation of Loess Plateau in northern Shaanxi Province by InVEST model[J]. Geographical Research 2016, 35(4): 664-676.]

[26] 包玉斌, 刘康, 李婷, 等. 基于InVEST模型的土地利用变化对生境的影响——以陕西省黄河湿地自然保护区为例[J]. 干旱区研究, 2015, 32(3): 622-629. [Bao Yubin, Liu Kang, Li Ting, et al. Effects of land use change on habitat based on InVEST model: Taking Yellow River Wetland Nature Reserve in Shaanxi Province as an example[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(3): 622-629.]

[27] 王晓玉, 冯喆, 吴克宁, 等. 基于生态安全格局的山水林田湖草生态保护与修复[J]. 生态学报, 2019, 39(23): 8725-8732. [Wang Xiaoyu, Feng Zhe, Wu Kening, et al. Ecological conservation and restoration of life community theory based on the construction of ecological security pattern[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(23): 8725-8732.]

[28] 高梦雯, 胡业翠, 李向, 等. 基于生态系统服务重要性和环境敏感性的喀斯特山区生态安全格局构建——以广西河池为例[J]. 生态学报, 2021, 41(7): 2596-2608. [Gao Mengwen, Hu Yecui, Li Xiang, et al. Construction of ecological security pattern based on the importance of ecosystem services and environmental sensitivity in karst mountainous areas: A case study in Hechi, Guangxi[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(7): 2596-2608.]

[29] McRae B H, Kavanagh D M. Linkage Mapper Connectivity Analy-

sis Software and User Guide[EB/OL]. https: //circuitscape.org/linkagemapper, 2021-07-01.

[30] McRae B H. Barrier Mapper Connectivity Analysis Software and User Guide[EB/OL]. https: //circuitscape. org/linkagemapper/, 2021-07-01.

[31] McRae B H. Centrality Mapper Connectivity Analysis Software and User Guide[EB/OL]. https: //circuitscape. org/linkagemapper, 2021-07-01.

Construction of an ecological security pattern and zoning optimization for territorial space in the Liupan Mountain Area

BAO Yubin[1], WANG Yaozong[2], LU Feng[1], LIU Zizeng[1], MA Dawei[1], YANG Yong[1], WU Juan[1], ZHANG Yongkang[1]

(1. Ningxia Institute of Remote Sensing, Survey and Mapping, Yinchuan 750021, Ningxia, China; 2. Ningxia Ecological Environment Information and Emergency Center, Yinchuan 750021, Ningxia, China)

Abstract: The establishment of an ecological security pattern is a crucial step in ensuring human well-being and healthy growth. It is a particular measure for putting the notion of “life community” into reality. The critical ecological location and abundant ecological resources of Ningxia’s Liupan Mountain Area make it indispensable in ensuring regional ecological security. In this study, we use the InVEST model and the circuit theory landscape model (Circuitscape) to completely integrate the benefits of ecosystem service assessment and ecological corridor identification. Meanwhile, we use the “sources-corridors-nodes” paradigm to build the ecological security pattern and complete ecological restoration zoning. According to the findings, there are 75 ecological sources in the Liupan Mountain Area, accounting for 21.8% of the total study area, which exhibits the characteristics of mountain spatial pattern and county expansion and serves as ecological strategic points and nodes in the construction of ecological security patterns. With a total length of 211.6 km, 47 significant ecological corridors link the nature reserves and the primary ecological sources. Meanwhile, 547 ecological pinchpoints and 217 ecological barriers, totaling 626.9 km^2 and 893.9 km^2, need urgent conservation and restoration. The area of ecological barriers accounts for 17.4% of the total, which requires the most stringent ecological protection to maximize the regional ecological radiation effect. Meanwhile, the proportions of conservation areas, restoration and improvement areas, and control and coordination areas are 6.5%, 38.2%, and 37.9%, respectively. To limit the danger of ecological deterioration, protected zones have strengthened surveillance of closed slopes and prohibited grazing, as well as plant regeneration. The restoration and improvement regions need the implementation of diverse strategies to enhance ecological quality to sustain the ecological network’s healthy, stable, and virtuous cycle and to capitalize on the ecological buffer zone impact. To thoroughly coordinate and maintain development, it is critical to scientifically outline the three zones and three lines, as well as enhance the degree of land conservation and intense usage. The findings might be useful for integrated and systematic ecological conservation and restoration, as well as policy development and project layout in the Liupan Mountain Area.

Keywords: ecological restoration for territorial space; ecological security pattern; circuit theory; InVEST model; Liupan Mountain